

Grzegorz GRZECZKA<sup>1</sup>  
Adam POLAK<sup>2</sup>

### ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA OGNIW PALIWOWYCH W AUTONOMICZNYCH PLATFORMACH PODWODNYCH

*Duży zasięg działania jest ważnym parametrem charakteryzującym platformy mobilne. Podstawowym warunkiem jego zapewnienia jest wykorzystanie źródła energii o wysokiej sprawności. Takim źródłem może być ogniwo paliwowe, czyli urządzenie elektrochemiczne, które w bezpośrednim procesie zamienia energię chemiczną zgromadzoną w paliwie na energię elektryczną. W artykule przedstawiono wyniki analizy wymagań objętościowych układu wykorzystującego ogniwo paliwowe zapewniającego czas pracy porównywalny z stosowanym dotychczas akumulatorem.*

### THE ANALYSIS OF APPLICABILITY OF FUEL CELLS FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

*A long-distance performance is a significant parameter for mobile platforms. A key condition is a highly efficient source of energy. Fuel cells, i.e. electrochemical devices, capable of direct conversion of chemical energy accumulated in fuel into electrical energy, occurred to be relevant. In this paper there were presented the results of the analysis pertaining to the volumetric requirements of the system exploiting the fuel cell that is capable of ensuring the running time comparable with that of conventionally used rechargeable batteries.*

#### 1. WSTĘP

Kilka minionych dziesięcioleci w dziedzinie napędu cechuje się zastojem technologicznym. Opieramy się na silniku spalinowym a rozwój dotyczy jedynie prób poprawy właściwości w zasadzie niedoskonałego silnika cieplnego. Obfitość złóż ropy naftowej oraz dynamiczny rozwój przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego doprowadziły do przekonania, że technologia silników spalinowych uwzględniając wszystkie ich odmiany jest wystarczająca do zaspokojenia potrzeb współczesnego społeczeństwa. Nawet efekty badań naukowych nad alternatywnymi źródłami energii i nowymi rodzajami napędu pozostawały niewykorzystane.

<sup>1</sup> Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 69.  
Tel: + 48 58 626-29-94, E-mail: g.grzeczka@amw.gdynia.pl

<sup>2</sup> Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 69.  
Tel: + 48 58 626-26-84, E-mail: a.polak@amw.gdynia.pl

XXI wiek przyniósł pewne zmiany i w wyniku lepszego przepływu informacji szerokie gremium uświadomiło sobie, że w krótkim okresie zasoby ropy naftowej na świecie nieuchronnie się wyczerpią, że rozwiązania problemów komunikacyjnych w dużych skupiskach ludzkich wymagają niekonwencjonalnych rozwiązań, a ochrona środowiska przestała być zmartwieniem tylko niewielkiej grupy ekologów.

Jednym z bardziej obiecujących rozwiązań technologicznych, dojrzałym do wprowadzenia na szeroką skalę jest technologia ogniw paliwowych. Zalety ogniw paliwowych, jako źródła energii dla środków transportu to: wysoka sprawność wynikająca z bezpośredniej przemiany energii (65% dla ogniwa paliwowego w porównaniu z 35% dla silnika spalinowego), bardzo dobry stosunek objętości i masy do wytwarzanej mocy, brak elementów współpracujących mechanicznie - co skutkuje brakiem wibracji i hałasu oraz wszelkich negatywnych skutków tarcia, zużywanie reagentów tylko w trakcie ruchu. Efektem działania ogniwa paliwowego jest energia elektryczna, co uzasadnia wykorzystanie napędu elektrycznego ze wszystkimi jego korzyściami: wysoka sprawność silników elektrycznych, stałość momentu obrotowego i wiele innych [1,2,3].

Obecnie istnieje wiele dostępnych na rynku rozwiązań konstrukcyjnych ogniw paliwowych. Ich konstrukcja, materiały, technologia wytwarzania itd. wynikają z wieloletnich zaawansowanych i kosztownych badań. Duże konsorcja w ramach programów rządowych rozwiniętych państw opracowały rozwiązania komunikacyjne, które są stopniowo wdrażane[7]. Z powyższego wynika, że należy jak najszybciej włączyć się w proces stosowania technologii wodorowej. Takim działaniem jest próba zastosowania polimerowego niskotemperaturowego ogniwa paliwowego do zasilania platformy podwodnej, co zostało opisane w niniejszym artykule.

## **2. OGNIWO PALIWOWE JAKO ŹRÓDŁO ENERGII W PLATFORMACH PODWODNYCH**

W przypadku platformy podwodnej kluczowymi parametrami są objętość i masa źródła energii. Z opisów teoretycznych wynika, że niskotemperaturowe ogniwa paliwowe typu PEM mają najlepsze z dostępnych obecnie źródeł współczynniki generowanej energii elektrycznej na jednostkę masy i objętości [4,5,6]. Jednak do pełnego oszacowania możliwości zastąpienia szeroko do tej pory stosowanych akumulatorów, do parametrów samego ogniwa należy dodać parametry zbiorników reagentów w ilości odpowiadającej pojemności elektrycznej równoważnego akumulatora. Ze względu na bardzo kosztowne badania prototypowe, na obecnym etapie postanowiono przeprowadzić badania symulacyjne, zrealizowane jednak na eksperymentalnie zweryfikowanym modelu matematycznym.

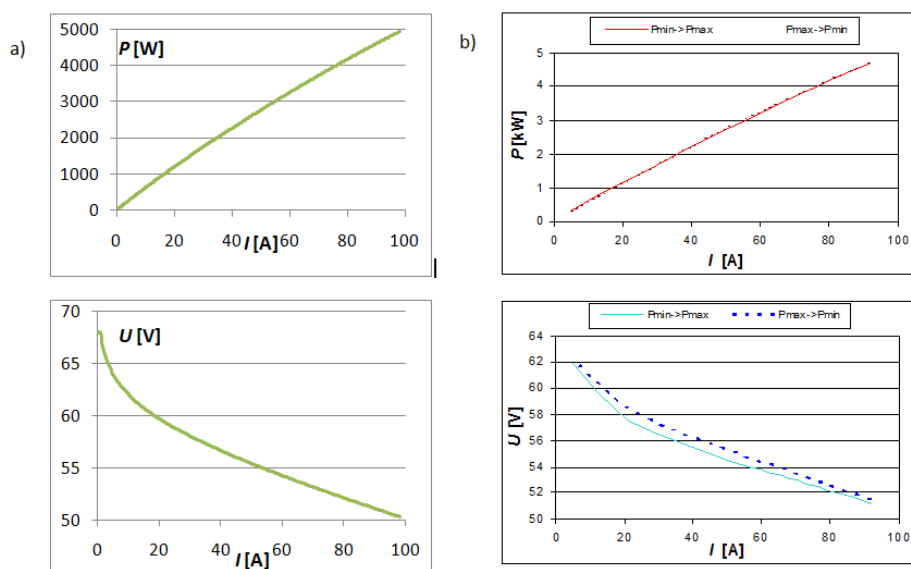
### **2.1 Weryfikacja modelu matematycznego**

Do weryfikacji wykorzystano zrealizowany w Laboratorium Napędów Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki i Automatyki Wydziału Mechaniczno Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej, system ogniwa paliwowego typu PEM o mocy 6 KW(rys. 1).



Rys. 1 System ogniwa paliwowego w laboratorium Instytutu Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej Akademii Marynarki Wojennej

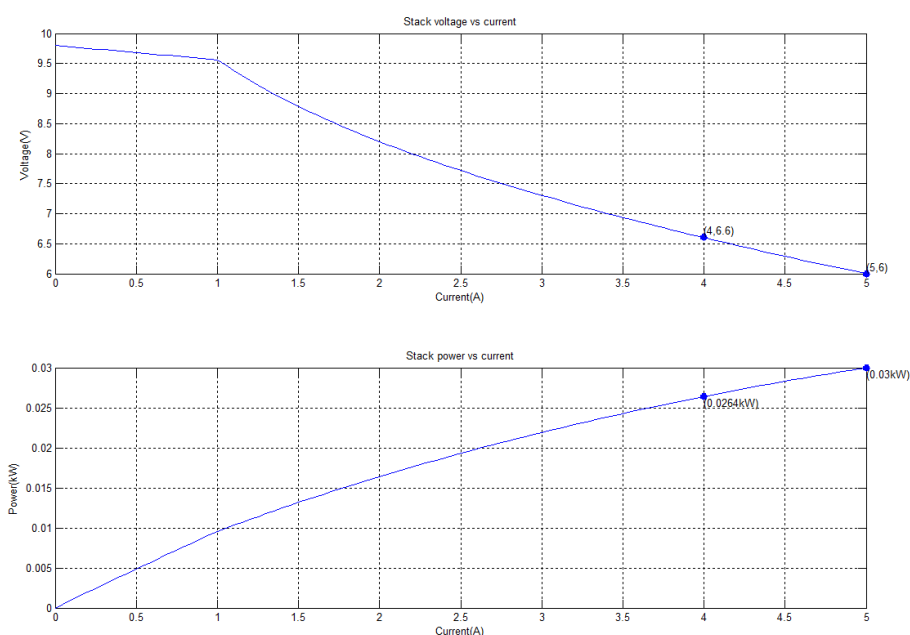
Do badań symulacyjnych wykorzystano model zawarty w pakiecie Simulink - Matlab. W pierwszym etapie na bazie otrzymanych wyników rzeczywistych pomiarów dostosowano model matematyczny. Do modelu wprowadzono parametry rzeczywistego ogniwa. Z porównania otrzymanych wyników można wywnioskować iż model ogniwa dobrze odzwierciedla zachowanie rzeczywistego obiektu.



Rys. 2 Charakterystyki pracy ogniwa a) symulowanego, b) rzeczywistego

Model został stworzony w sposób umożliwiający regulację jego parametrów oraz ustawianie w czasie wielkości charakteryzujących reagenty doprowadzane do ogniwa takie jak: ciśnienie, temperatura, skład paliwa itp. Poprzez dobór nastaw dostrojono model do uzyskania zgodności otrzymywanych wyników symulacyjnych z pomiarami w rzeczywistym układzie.

W kolejnym kroku dostrojony model został zmodyfikowany do uzyskania wyjściowego napięcia elektrycznego zbliżonego do napięcia akumulatora zastosowanego w prototypowym układzie platformy podwodnej. Uzyskane na tym etapie wyniki symulacji (rys. 3) pokrywają się z dostępnymi na stronach internetowych producentów danymi dotyczącymi ogniwa tej mocy.



Rys. 3 Charakterystyka pracy zamodelowanego ogniwa paliwowego

Tab. 1. Parametry ogniwa PEMFC do zasilania platformy podwodnej

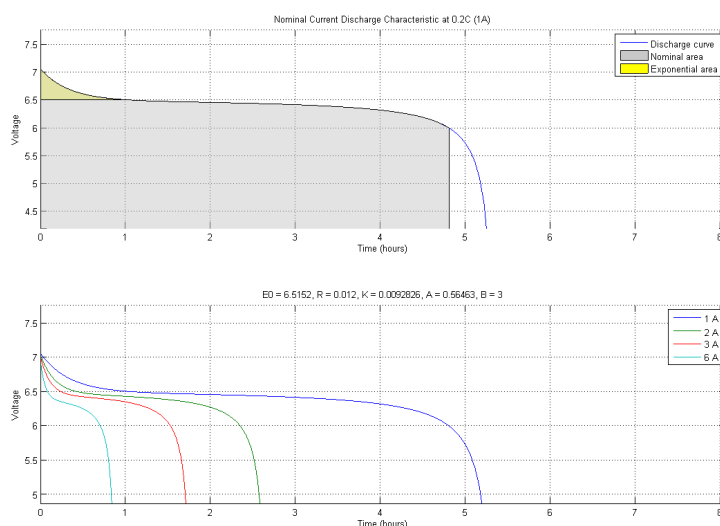
|                         |     |
|-------------------------|-----|
| Ilość cel               | 10  |
| Napięcie jałowe [V]     | 9.8 |
| Napięcie znamionowe [V] | 6.6 |
| Prąd znamionowy [A]     | 4   |
| Sprawność nominalna [%] | 45  |
| Prąd maksymalny [A]     | 5   |

W kolejnych etapach zweryfikowany model posłużył do oszacowania wymagań dla wybranej platformy podwodnej.

## 2.2 Model systemu zasilania platformy mobilnej

System zasilania platformy podwodnej został utworzony w sposób umożliwiający wybór źródła energii elektrycznej. Odbiornik może być zasilany z akumulatora Ni-MH, lub z ogniwa paliwowego PEMFC.

Akumulator Ni-MH został zamodelowany z wykorzystaniem elementu dostępnego w bibliotekach programu Simulink. Model ten uwzględnia typ akumulatora, jego pojemność oraz napięcie znamionowe, charakterystykę obciążeniową z uwzględnieniem rozładowania, początkowy stan naładowania, znamionowy prąd rozładowania oraz rezystancję wewnętrzną.



Rys. 4 Charakterystyki rozładowania akumulatora

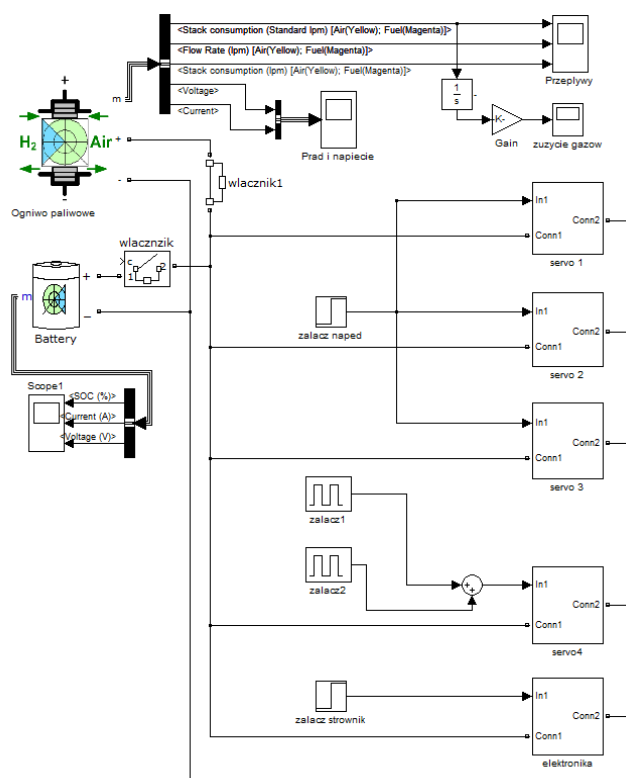
Parametry akumulatora zostały dobrane wg danych rzeczywistych akumulatorów.

Tab. 2. Parametry akumulatora Ni-MH

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| Napięcie znamionowe [V]             | 6     |
| Pojemność znamionowa [Ah]           | 5     |
| Znamionowy prąd rozładowania [A]    | 1     |
| Rezystancja wewnętrzna [ $\Omega$ ] | 0.012 |

Model samego odbiornika został podzielony na 5 podstawowych bloków: 3 bloki serwowymotorów napędowy, 1 blok serwowymotoru sterującego oraz 1 blok elektroniki

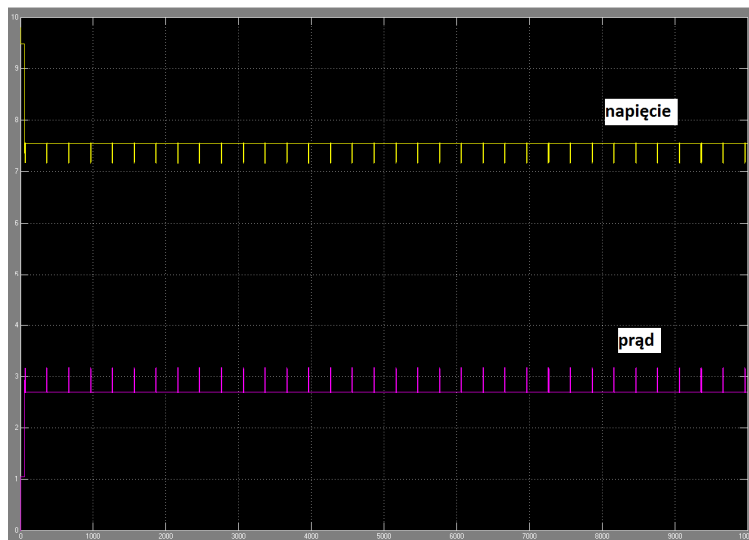
sterującej całą platformą. Elementy te zostały utworzone w sposób umożliwiający ich dowolne wystawianie (zostało wyprowadzone złącze sterujące z każdego bloku), dzięki czemu możliwe jest przeprowadzenie symulacji pracy obiektu w wielu wariantach pracy.



Rys. 5 Model systemu zasilania platformy mobilnej z akumulatora Ni-MH i ogniwa paliwowego PEMFC

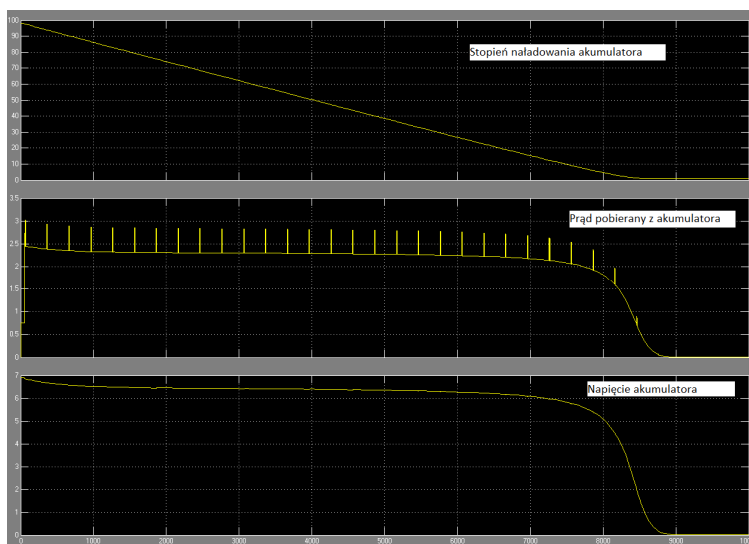
## 2.2 Porównawcza analiza symulacyjna zasilania

Badania polegały na wykonaniu serii symulacji poboru energii z zamodelowanych źródeł w charakterystycznych stanach platformy. Do niniejszego opracowania wybrano stan pochłaniający największą ilość energii ze źródeł -3 serwomotory pracują w trybie ciągłym (serwomotory napędowe), 1 serwomotor sterujący pracuje w trybie dorywczym oraz sterownik pracujący w trybie ciągłym.



Rys. 6 Przebiegi napięć i prądów przy zasilaniu obiektu modelowego z ogniwa paliwowego.

Wyniki symulacji zrealizowanej z wykorzystaniem modelu akumulatora przedstawiono na rysunku 7.

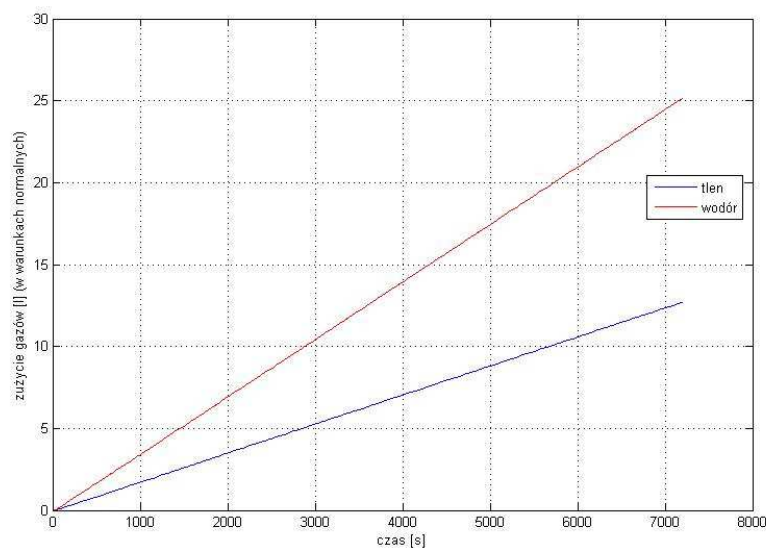


Rys. 7 Przebiegi napięcia i prądu podczas zasilania obiektu modelowego z akumulatora Ni-MH.

Wyniki symulacji z wykorzystaniem modelu ogniwa paliwowego przedstawiono na rys 6 oraz 8.

Z uzyskanych przebiegów wynika, że czas pracy platformy przy całkowicie naładowanym akumulatorze to 2 godziny 13 minut. W tym czasie ogniwo paliwowe zużyje odpowiednio 12.66 litrów tlenu oraz 25.1 litrów wodoru w warunkach normalnych.

Uzyskane wyniki są podstawą do doboru technologii magazynowania wodoru umożliwiającej jak najefektywniejsze wykorzystanie dostępnej na wybranej platformie podwodnej przestrzeni.



Rys. 8 Zużycie wodoru i tlenu zasilającego ogniwo

### 2.3 Dobór zbiorników paliwa

W tabeli poniżej zostały zestawione parametry przykładowego zbiornika, który może być zastosowany, jako główne źródło wodoru dla omawianego ogniwa paliwowego. W celu zapewnienia odpowiedniego przepływu wodoru oraz zapewnienia paliwa na porównywalny czas pracy jak przy zasilaniu z akumulatora, niezbędne jest wyposażenie platformy w trzy równoległe połączone zbiorniki. Tak dobrane zbiorniki paliwa wystarczą na ok. 2h35' pracy w analizowanym trybie.



Tab. 3. Parametry zbiornika wodoru

| Parametr                  | PRAGMA INDUSTRIES MH10 | Jednostka     |
|---------------------------|------------------------|---------------|
| Pojemność                 | 10                     | Litr normalny |
| Ciśnienie ładowania       | 1.5                    | MPa           |
| Ciśnienie rozładowania    | 0.2                    | MPa           |
| Nominalny przepływ wodoru | 0.1 (w 25°C)           | NL/min        |
| Wymiary                   | Φ25D xL45              | mm            |
| Waga całkowita            | 100                    | g             |



Rys. 9 Zbiorniki wodoru 10 litrów (w warunkach normalnych) oraz akumulatory Ni-MH 1.2 V 5000mAh

Odpowiednikiem modelowego akumulatora może być 5 połączonych szeregowo akumulatorów Ni-MH a pojemności 5000mAh każdy i napięciu znamionowym 1.2 V. Przykładem takiego akumulatora jest akumulator firmy IMEDION [8] Wymiary takiego akumulatora to 25,5x50 mm (rozmiar R14).

### 3. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że zastosowanie ogniw paliwowych, jako głównego źródła energii do zasilania tak specyficznego urządzenia, jakim jest podwodna platforma mobilna, jest zagadnieniem jak najbardziej realnym.

Specyfika platformy podwodnej narzuca na projektanta restrykcyjne wymogi, co do ciężaru jak i objętości zastosowanych elementów składowych takiej platformy. Ogniwo paliwowe w tym przypadku bardzo dobrze wpasowuje się w te wymagania, gdyż w obliczu obecnego stanu wiedzy technicznej jest to źródło energii elektrycznej cechujące się największą gęstością energii na jednostkę objętości. Wyniki badań zaprezentowane w niniejszym artykule wskazują, że w celu zapewnienia podobnego czasu pracy w identycznych stanach eksploatacyjnych jak dla zasilania z akumulatorów, możliwe jest zasilanie platformy ogniwem paliwowym korzystającym ze zbiorników gazów, które objętościowo są mniejsze od standartowych obecnie stosowanych akumulatorów. Obala to powszechną obawę przed problematycznymi sposobami magazynowania wodoru. Dzięki przeprowadzonej symulacji i wynikających z niej wniosków można stwierdzić, iż system ogniwa paliwowego wydaje się być atrakcyjny dla aplikacji transportowych.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] "The Hydrogen Economy, Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs," National Academy Press, Washington, D. C., (2004).
- [2] "Energy and Transportation, Challenges for the Chemical Sciences in the 21st Century," National Academy Press, Washington D. C., (2003).
- [3] M. L. Perry and T. F. Fuller, "A Historical Perspective of Fuel Cell Technology in the 20th Century," *J. Electrochem. Soc.*, **149**, S59-S67 (2002).
- [4] B. C. H. Steele and A. Heinzl, "Materials for Fuel-cell Technologies," *Nature*, **414**, 345-352 (2001).
- [5] D. E. Curtin *et al.*, "Advanced Materials for Improved PEMFC Performance and Life," *J. Power Sources*, **131**, 41-48 (2004).
- [6] "Basic Research Needs for the Hydrogen Economy, Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Hydrogen Production, Storage, and Use," (May 2003).
- [7] <http://www.fuelcelltoday.com>
- [8] <http://www.greenbatteries.com/mhrci2.html>